

## ВПЛИВ КАРБІДУ ВОЛЬФРАМУ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ (Огляд)

Б.В. Стефанів, С.В. Максимова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: stefanivbogdan61@gmail.com

Покриття поверхні зносостійкими матеріалами – надійний і економічно ефективний процес, який використовується для виробництва та ремонту інструментів, матеріалів і компонентів машин, що вимагає бажаних властивостей поверхні, таких як стійкість до корозії, ерозії та зносу. Зносостійкі покриття охоплюють широкий спектр застосувань у багатьох галузях промисловості, наприклад, в автомобільній і авіакосмічній, нафтовидобувній і гірничодобувній (в якості компонентів бурових доліт або прохідницьких комбайнів), при виготовленні різального інструменту для обробки металевих компонентів. У даному огляді наведені основні типи зносостійких покриттів на основі Co, Ni, Fe, Cu, Cr, NiCrBSi, NiCrBSiFe та ін. з частинками карбіду вольфраму 10...90 % у матриці. Змінюючи фазовий склад і структуру поверхні матеріалу шляхом формування захисних покриттів, можна домогтися істотного підвищення експлуатаційних властивостей, таких як: твердість, міцність, зносостійкість, жаростійкість, корозійна стійкість та ін. Як і в зносостійких покриттях, так і в твердих сплавах, з трьох зазначених карбідних фаз у системі W-C, а саме WC, W<sub>2</sub>C і WC<sub>1-x</sub>, WC є єдиним стабільним карбідом при кімнатній температурі та є фазою, яка повинна бути присутня в зносостійких покриттях з метою отримання оптимальних властивостей. Враховуючи швидкий розвиток зносостійких покриттів, у цій статті наведено огляд основних типів зносостійких абразивних покриттів, способів нанесення та їх властивостей. Результати наведених досліджень можуть бути корисними для науковців та інженерного складу підприємств, що займаються підвищенням експлуатаційних властивостей конструкцій різного призначення. Бібліогр. 22, табл. 7, рис. 18.

*Ключові слова:* зносостійкі, композитні покриття, карбід вольфраму, зношування, зносостійкість, абразивостійкість, наплавлення, мікроструктура, твердість

**Вступ.** У даний час зносостійкі покриття широко використовуються для зменшення або усунення зношування, продовження експлуатаційного терміну служби виробів. Враховуючи швидкий розвиток зносостійких покриттів, у цій статті представлено огляд основних типів зносостійких покриттів, їх властивості та використання. Щоб отримати тривалий термін експлуатації зносостійких покриттів, які піддаються сильному механічному зношенню, потрібні матеріали з підвищеними властивостями, такими як висока твердість і здатність витримувати високі температури. Карбід вольфраму є матеріалом, який має ці властивості, але виробництво великого виробу для гірничодобувної та нафтогазової промисловості або сільськогосподарства повністю з цього матеріалу не є практично можливим і економічно доцільним, оскільки можна отримати певні недоліки матеріалу, такі як крихкість, значна вага та висока вартість. Для ефективного використання властивостей матеріалів поверхню звичайної сталі покривають композитним покриттям, що дозволяє підвищити міцність, зменшити вагу та ціну завдяки підвищеній зносостійкості карбідів вольфраму. Отримати зносостійке композиційне покриття можна різними методами, у тому числі, зварюван-

ням (ручним дуговим, плавким і неплавким електродом), лазерним, плазмовим, магнетронним напленням та ін.

У даному огляді наведено можливості створення та застосування композитних покриттів на базі систем: WC–W<sub>2</sub>C, WC–Co, WC–Ni, WC–Fe, WC–Ni–Fe, WC(Co)–NiCrBSiFe, WC–NiCrSiB, які використовуються для продовження терміну служби інженерних конструкцій, що піддаються зносу, ерозії, корозії.

**Властивості карбіду вольфраму.** Вольфрам є металевим елементом з винятковими механічними та тепловими властивостями; він має найвищу температуру плавлення з усіх металевих елементів. У поєднанні з вуглецем він утворює карбід вольфраму [1, 2], який вважається тугоплавким карбідом, що має температуру плавлення понад 1800 °С. Він характеризується високою твердістю та задовільною хімічною стійкістю. Карбід вольфраму може існувати у вигляді двох фаз: WC і W<sub>2</sub>C, твердість яких становить 2000...2700 HV [1]. Карбід вольфраму може бути монокристалічним WC із вмістом вуглецю ≈ 6,1 % або евтектичним WC/W<sub>2</sub>C із вмістом вуглецю ≈ 4 %, як видно на фазовій діаграмі вуглець–вольфрам (рис. 1). Властивості вольфраму та карбідів вольфраму представлені в табл. 1.

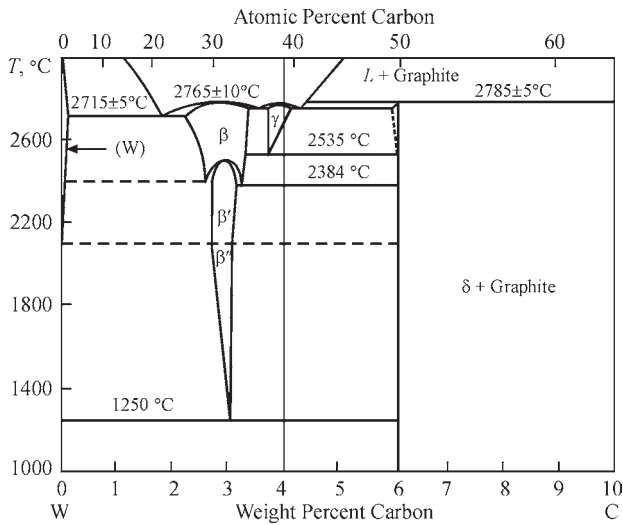


Рис. 1. Бінарна діаграма W–C [1]

Таблиця 1. Властивості вольфраму та карбіду вольфраму [2]

Тип	Температура плавлення, °C	Густина, г/см <sup>3</sup>
W	3410	19,3
WC	2870	17,2
W <sub>2</sub> C	2730	15,8

Зазвичай карбід вольфраму, крім нанесення у складі покриття на поверхню, використовується як цементований карбід в інструментах із твердого металу. Карбіди вольфраму в цьому випадку спікаються з металевою зв'язкою, частіше кобальтом і рідше нікелем, оскільки ці елементи забезпечують хороше змочування основного металу. З метою отримання сферичної форми (рис. 2, а) литі карбіди піддаються сфероїдизації плазмовим пальником.

Плавлені та подрібнені карбіди вольфраму (FTC) (рис. 2, б) виготовляються шляхом плавлення в електродуговій печі з подальшим охолодженням і дробленням та характеризуються неправильною гострою формою. Плавлені карбіди вольфраму складаються з евтектики, яка містить WC/W<sub>2</sub>C, що має

пероподібну структуру, як у сферичних литих карбідів вольфраму. Монокристалічні карбіди (рис. 2, в) мають структуру, подібну до карбідів FTC з дуже гострими краями. Як видно на рисунку, часточки карбіду виглядають сколеними з тріщинками. Плавлений карбід WC–Co (PA2) (рис. 2, з) також має неправильну форму, але не таку гостру, як монокристалічний або FTC. Агломератний карбід WC–Co (рис. 2, д) має сферичну форму частинок з сателітами. Дослідження поперечного перерізу карбіду показує наявність утворення пор під час виробництва.

Серед перспективних традиційних зносостійких матеріалів для захисту металевих виробів від зношування є евтектичний сплав системи WC–W<sub>2</sub>C (реліт) [3, 4]. Це евтектичний сплав моно- та напівкарбіду вольфраму WC+W<sub>2</sub>C з температурою плавлення 2735 °C та мікротвердістю в межах 1000...2400 HV (залежно від виробника) [4]. Вихідний евтектичний сплав карбідів вольфраму WC–W<sub>2</sub>C було отримано відцентровим розпиленням виливків, виплавлених у печі Таммана за температури 3100 °C. В якості плазмоутворюючого газу використовували аргон, азот і аргоно-азотну суміш у співвідношенні 50:50. Твердість за Віккерсом евтектичного сплаву системи WC–W<sub>2</sub>C, отриманого відцентровим розпиленням, у залежності від зміни захисного та плазмоутворюючого газового середовища й дисперсності частинок порошку суттєво відрізняється. Найбільш дрібнокристалічна структура спостерігається у сплаві, отриманому в захисному середовищі аргону з плазмоутворюючим газом азотом. Методом кількісного металографічного аналізу встановлено, що підвищення механічних властивостей корелює зі зменшенням співвідношення між кількістю фаз

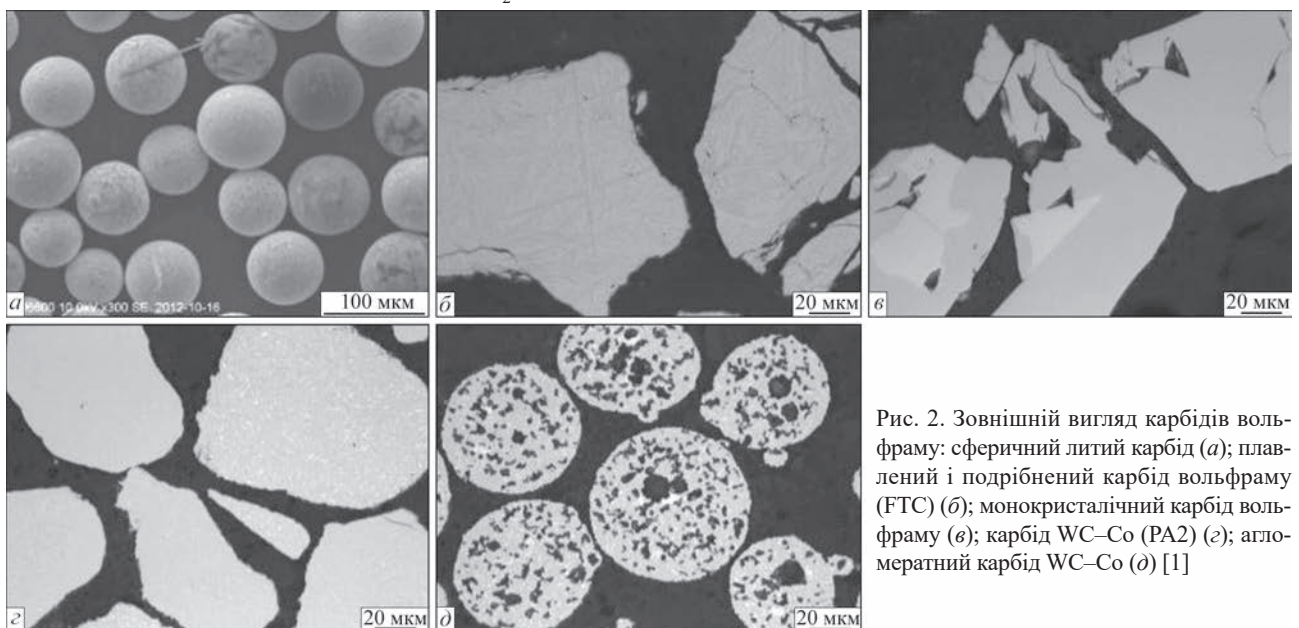


Рис. 2. Зовнішній вигляд карбідів вольфраму: сферичний литий карбід (а); плавлений і подрібнений карбід вольфраму (FTC) (б); монокристалічний карбід вольфраму (в); карбід WC–Co (PA2) (з); агломератний карбід WC–Co (д) [1]

$W_2C$ , WC і  $WC_{1-x}$ , товщиною прошарків фаз у зернах та їх морфологією [3]. Кількість  $W_2C$  зменшується при збільшенні швидкості охолодження, що призводить до підвищення твердості сплаву, який містить дрібні часточки порошку реліту. Зменшення твердості частинок порошку реліту обумовлено переважною втратою вуглецю під час розпилення та збільшенням кількості й розмірів фази  $W_2C$  [3].

Технологія процесу термовідцентрового розпилення зливків плавненого карбіду вольфраму дозволяє одержувати порошок із частинками сферичної форми розміром 50...1000 мкм у вакуумній камері [4]. Твердість і підвищені характеристики міцності сферичних гранул карбіду вольфраму значною мірою залежать від стехіометричного складу евтектичного сплаву WC+ $W_2C$ . Дотримання співвідношення в межах 78...82 %  $W_2C$  і 18...22 % WC у поєднанні з дрібнозернистою структурою, яка утворюється внаслідок високих швидкостей кристалізації, забезпечують мікротвердість гранул понад 3000 HV. Слід зауважити, що мікротвердість карбідів вольфраму, що отримані іншими методами, значно менша: дробленого WC+ $W_2C$  (1800...2300 HV), кристалічного WC (1900...2150 HV), сферичного оплавленого WC+ $W_2C$  (1900...2800 HV) [4]. Плавлені карбіди вольфраму, гранули яких дроблені або сферичні, застосовуються для наплавлення на буровий інструмент.

**Сучасні розробки щодо нанесення покриттів методом газополуменевого наплавлення.** Наразі метод ручного газополуменевого наплавлення набув значного поширення завдяки простоті роботи з обладнанням, високій здатності нанесення покриття, локальному нагріванню матеріалу, що наплавляється. Порошки марок Реліт ЛКВ «З»-2, Реліт ЛКВ «З»-6, Реліт ЛКВ «С» і VSNGN-88 (сплави на основі нікелю та литі карбіди вольфраму) мають

високу твердість, зносостійкість і можуть використовуватися як добавки при наплавленні зносостійких покриттів [5]. Відомо, що порошки литого карбіду вольфраму складаються з кількох фаз. Тому важливою є наявність фази, що має найбільшу твердість. У табл. 2 для наочності представлені дані про мікротвердість різних фаз литого карбіду вольфраму.

Порошки Реліт ЛКВ «З»-2 та Реліт ЛКВ «З»-6 мають однаковий фазовий склад, але вміст  $W_2C$  в Реліті ЛКВ «З»-2 (64,8 мас. %) перевищує вміст ЛКВ «З»-6 (59,4 мас. %). Гранулометричний склад цих порошків значно відрізняється. Їх можна використовувати в якості покриття для корпусу бурового інструменту [5].

Слід зауважити, що концентрація WC/Co у порошок NiCrBSi-WC/Co впливає на фізико-механічні властивості покриттів після їх наплавлення [6]. Концентрація може змінюватись від 0 % WC/Co у суміші до 50 % WC/Co. Комбінації покриттів WC і Ni з концентраціями WC (0, 12,5, 25 і 50 %) характеризуються різною мікроструктурою (рис. 3).

Зносостійкість покриття залежить від відсотка WC. Показано, що вищий масовий знос покриття спостерігався при більших навантаженнях у сплавах із підвищеною кількістю WC. Це можна пояснити розчиненням WC в основній матриці. Розчинення WC досягло 12,5 % (за [6]), що призводить до більшого масового зносу покриття.

Порівняно з іншими процесами, при наплавленні покриттів можна використовувати набагато більші частинки WC для створення металевого шару з вищою зносостійкістю. Зносостійке покриття з карбіду вольфраму/міді (WC/Cu) наносили на сталеву підкладку за допомогою високотемпературного паяння в печі [7]. В якості армування використовували відносно великі частинки WC (до 850 мкм), їх насичували припоєм на основі міді із задовільною

Таблиця 2. Властивості матричних покриттів [5]

Карбід	Тип кристалічної решітки	Мікротвердість, МПа	Густина, г/см <sup>3</sup>	Температура плавлення, °C
WC	гексагональна	17000	15,70	2600
$W_2C$	гексагональна	30000	17,15	2850

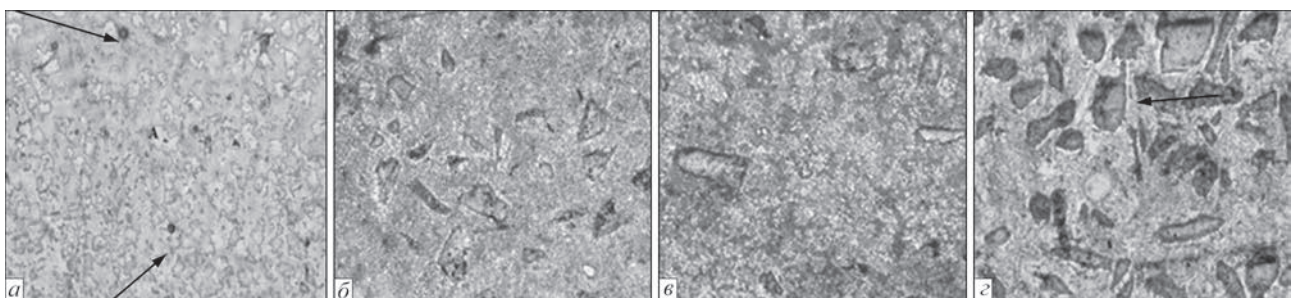


Рис. 3. Мікроструктури покриттів з різними концентраціями WC: сплав 1060 (а); сплав 1060 з 12,5 мас. % WC (б); сплав 1060 з 25 мас. % WC (в); сплав 1060 з 50 мас. % WC (г) [6]

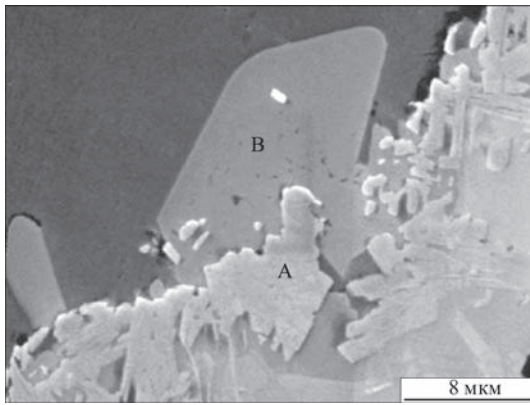


Рис. 4. Мікроструктура (×5000) межі карбід/матриця [7]

Таблиця 3. EDS-аналіз межі між карбідом і матрицею [7]

Елемент	Карбід/матриця інтерфейс (А)	Фаза в матриці (В)
W	89,08	59,99
Cu	4,24	5,98
Mn	0,47	4,04
Ni	2,74	13,04
Fe	3,46	22,15

в'язкістю. Утворювалось композиційне покриття, що характеризується міцною адгезією з основним металом. Дослідження мікроструктури показало, що зношування наплавленого покриття залежить від розміру та розподілу карбідів. На рис. 4 зображено мікроструктуру області розділу між карбідом і матрицею. Результати хімічного аналізу, отримані за допомогою енергодисперсійної спектроскопії (EDS) областей А і В, наведено в табл. 3. У зоні А на межі розділу є невелика кількість Cu, Mn і Ni, що свідчить про те, що сплав Cu розплавився і дифундує в WC, згодом утворюючи задовільний металургійний зв'язок на контактній поверхні.

Міцність зчеплення покриття з основним металом змінюється залежно від часу витримки під час наплавлення. Аналіз EDS області В показує, що є деяка кількість Fe, яка розчиняється в рідкому сплаві та згодом утворює нову фазу з WC. Результати випробувань [7] для композитного покриття показали вищу зносостійкість, ніж у кількох широко використовуваних сплавах WC–6Co. Відносно великий середній розмір карбідів є ефективним фактором у покращенні стійкості до абразивного зношування, оскільки частинки важче видалити з матриці.

Робота [8] присвячена дослідженню композитних покриттів для бурового інструменту, а саме марок WokaDur NiA і HR-6750, що містить литий карбід вольфраму у вигляді зерен з розміром частинок до 800 мкм, які рівномірно розподілені у матриці з нікелевого сплаву, та сплав HR-6750 з підшаром Rock Dur, які наносяться методом газотермічного наплавлення на різні сталеві підкладки марок Ст. 45 і Ст. ХВГ (рис. 5). Дослідження мікроструктури (рис. 5) та розподілу елементів у покритті виявило різницю в концентрації нікелю та хрому (табл. 4).

За результатами рентгеноструктурного аналізу встановлено (рис. 6), що в зразках з покриттям HR-6750 і підшаром Roc Dur 47 присутні фази WC, W<sub>2</sub>C, Cr, Cr<sub>7</sub>Ni<sub>3</sub> і CrNi.

Співвідношення фаз WC і W<sub>2</sub>C у цих зразках різне. У зразку HR-6750 переважає фаза WC порівняно з W<sub>2</sub>C, у зразку з підшаром Rock Dur 47 – зворотна залежність. У зразках з покриттям WokaDur NiA виявлено фази WC, W<sub>2</sub>C, CrNi. У процесі досліджень встановлено: мікротвердість матриць отриманих покриттів складає 590...660 HV, а мікротвердість частинок карбіду вольфраму – 2145...2455 HV [8].

**Сучасні розробки з нанесення покриттів термічним напиленням.** Термічне напилення в даний час є провідним способом, що дозволяє уникнути абразивного зносу матеріалів протягом багатьох днів, корозії при високих температурах, ерозійного зносу та напружень за рахунок збільшення терміну служби матеріалу в процесі експлуатації. Твердосплавні покриття, отримані термічним напиленням, мають типову товщину 100...500 мкм. Таким чином, термічне напилення (HVOF – високошвидкісне киснево-паливне розпилення і HVAF – високошвидкісне розпилення повітрям) дозволяє реалізувати функціональність твердих сплавів на поверхні великих деталей, які

Таблиця 4. Елементний аналіз матричних покриттів [8], мас. %

Покриття	Ni	Cr
HR-6750	81,09	18,91
HR-6750 з підшаром Rock Dur 47	85,56	14,44
WokaDur NiA	91,03	8,97

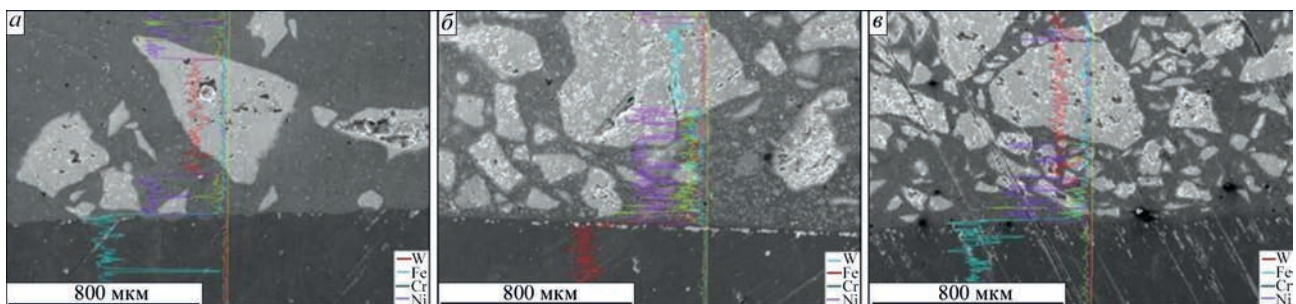


Рис. 5. Розподіл елементів по поверхні: WokaDur NiA – Ст. 45(а); HR-6750 – Ст. 45 (б); Rock Dur 47 з HR-6750 – Ст. ХВГ (в) [8]

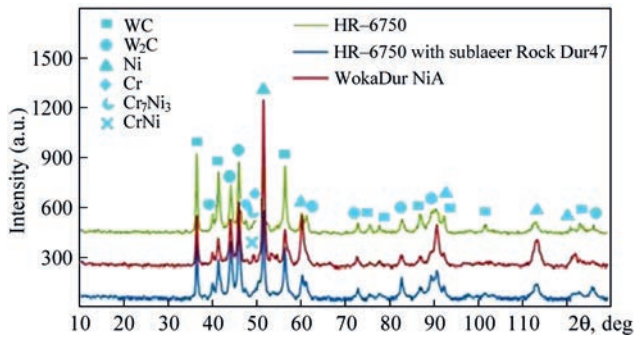


Рис. 6. Рентгенограма зразків з покриттям, нанесеним на підкладки Ст. 45 та Ст. ХВГ [8]

неможливо виготовити методом порошкової металургії з технічних та економічних причин.

Із застосуванням методу HVOF наносили покриття WC–10Ni та WC–12Co на лезо зі сталі (лита сталь BS 3100 GR A3) завтовшки 200...300 мкм [9]. Характеристики карбідної фази та морфології матриці Ni/Co виявили подібний розподіл армованих частинок карбиду в металевій матриці. Видимий розмір карбідного зерна для WC–12Co менший і становить у середньому 2,3 мкм, у той час як у покритті WC–10Ni розмір збільшується до 2,7 мкм. Показано, що швидкість зносу покриття WC–12Co значно нижча, ніж WC–10Ni. Це пов'язано з тим, що комбінація WC–12Co забезпечує високу твердість, яка становить близько 1700 HV порівняно з WC–10Ni (1500 HV) [9]. Характеристики зношування та адгезійна міцність карбідних покриттів, виготовлених за допомогою HVOF, покращуються шляхом подальшої термічної обробки після напи-

лення. Подальша термічна обробка зазвичай використовується для модифікації та корегування мікроструктури та фазового складу після нанесення покриття за допомогою HVOF і HVOF [10, 11].

Випробування (на зносостійкість, фрикційні властивості) термічно напиленних твёрдосплавних сплавів на базі систем WC–17 % Co, WC–10 % Co 4 % Cr, WC–15 % NiMoCrFeCo, Cr3C2–25 % NiCr, (Ti, Mo)(C, N)–37 % NiCo, NiCrSiB та AISI 316L, що отримані методом HVOF та плазмового напилення Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, продемонстрували чудові властивості та можуть бути рекомендовані як заміна традиційної обробки поверхні [12]. Вони успішно пройшли наступні методи випробувань на зношування: абразивну зносостійкість покриттів на сухому піску/гумовому колі відповідно до ASTM G-65; на стирання мокрою суспензією відповідно до ASTM G-75 та поведінку зносу ковзання при випробуваннях штифта на диску відповідно до ASTM G-99. Через схильність до крихкого розтріскування керамічне покриття Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, нанесене плазмовим напиленням, можна рекомендувати лише для чисто абразивних умов зношування. Випробувані металеві покриття з напиленням HVOF, NiCrSiB і AISI 316L не мали достатньої зносостійкості порівняно з традиційною обробкою поверхні, тому їх не слід використовувати в більш жорстких умовах [12].

Додавання WC(Co) до NiCrBSiFeC призводить до отримання композитного покриття з підвищеною твердістю та зносостійкістю [13]. Згідно з дослідженнями мікроструктура (рис. 7) напиленних

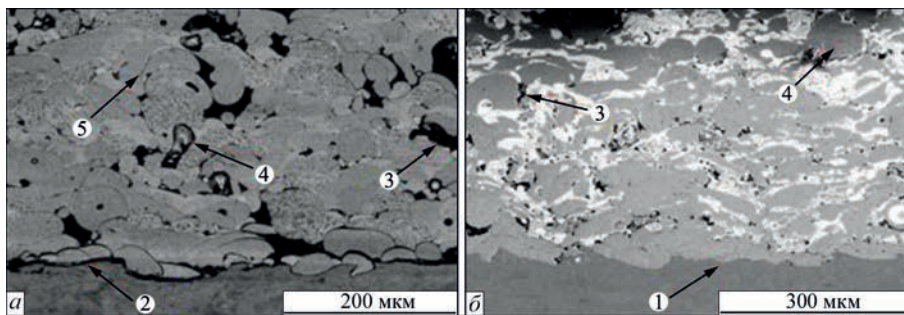


Рис. 7. Мікроструктура покриттів NiCrBSiFeC (а); NiCrBSiFeC-WC(Co) (б): 1 – межа підкладки–покриття; 2 – оксиди; 3 – пори; 4 – нерозплавлена частинка; 5 – межа розділу [13]

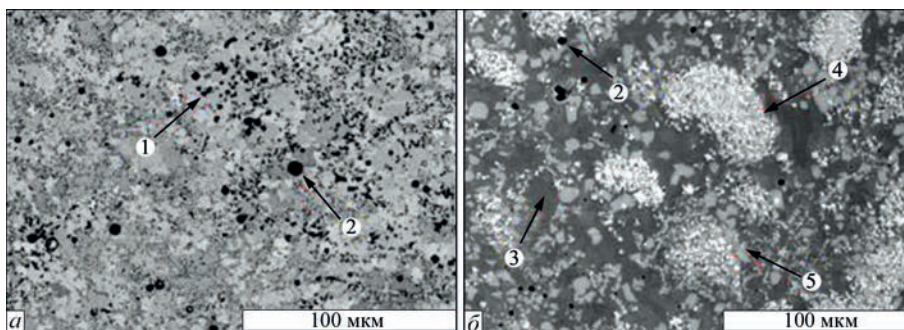


Рис. 8. Мікроструктура переплавлених покриттів NiCrBSiFeC (а); NiCrBSiFeC-WC(Co) (б): 1 – блокові виділення; 2 – округла пора; 3 – матриця; 4 – нерозплавлені карбіди WC; 5 – розплавлені карбіди WC [13]

шарів покриття характеризується загальною ламелярною структурою з порами, оксидами та нерозплавленими частинками.

Після переплавлення (рис. 8) блокові виділення повністю зникли, а шорсткість поверхні різко знизилася для покриттів NiCrBSiFeC і для NiCrBSiFeC–WC(Co).

Результати досліджень показують, що як NiCrBSiFeC, так і композитні покриття викликали значне збільшення твердості сталеві підкладки та підвищення зносостійкості завдяки утворенню виділень з високою твердістю, що добре дисперговані в кристалічній структурі [13].

**Сучасні розробки нанесення покриттів методом дугового зварювання.** Серед багатьох дослідників існує думка, що методи та параметри наплавлення суттєво впливають на продуктивність процесу отримання покриття. Метод дугового зварювання є економічним порівняно з іншими методами нанесення покриттів. У [14] досліджували вплив попередньої термічної обробки основного матеріалу на мікроструктуру лопаті з наплавленим карбідом вольфраму (WC). Карбід вольфраму наносили на поверхню леза із вуглецевої сталі за допомогою технології дугового нагріву, щоб підвищити його зносостійкість. Проводили попереднє нагрівання основного металу – леза за допомогою пальника протягом 3...5 хв (температура становила 300 °C) перед наплавленням покриття. Електрод, призначений для наплавлення леза, являє собою WC, який укладений у сталю трубку (довжина – 350 мм, діаметр – 6 мм). Матеріал WC (табл. 5) високої твердості має відмінну зносостійкість і стійкість до корозії, що підходить для застосування в абразивному середовищі.

Таблиця 5. Хімічний склад WC електрода [14]

Елемент	W	C	Mn	Si	Fe
Склад, %	60,2	3,1	1,5	0,4	Решта

Структура наплавленого зразка (рис. 9) містить три основні зони: карбідну (а), некарбідну матрицю (б) та підкладку (в). Карбіди різних розмірів в області покриття зосереджені в нижній частині поблизу межі розділу покриття–підкладка на глибині близько 1 мм.

Дослідниками встановлено, що попередня термічна обробка основного матеріалу забезпечує достатню теплову енергію, що сприяє більшому росту карбідних фаз у всій області покриття з рівномірним розподілом менших частинок карбіду в некарбідній області. Карбідна область демонструє вище значення твердості (1795 HV), ніж некарбідна (814 HV) [14]. Некарбідна зона складається з W і Fe, що вказує на близьке розташування карбіду та зв'язки. Попередня термічна обробка основного матеріалу передбачає рівномірний розподіл карбідних фаз WC по поверхні покриття, що може покращити твердість покриття та збільшити зносостійкість і термін служби наплавленого леза лопаті.

Для запобігання надмірному зносу покриття дослідження, в основному, зосереджені на вивченні та визначенні матеріалів, стійких до стирання. Для дослідження механізму зношування роликів шарошккового бурового долота твердосплавне зносостійке покриття наносили на зуби долота [15]. Дослідження показали, що умовно мікроструктуру можна поділити на три зони: покриття (зона А), перехідну зону (В) і тіло основи зуба (С). На рис. 10 показано мікроструктуру зразка та області розділу між тілом зуба та змішаною зоною після нанесення карбідного покриття на зуб методом плавлення.

Показано, що карбідне покриття містить наступні складові: гранули WC розміром 100...300 мкм, що скріплені кобальтовою зв'язкою; полікристалічні WC розміром 10...100 мкм зі зв'язкою, що поєднує гранули та полікристали WC на основі

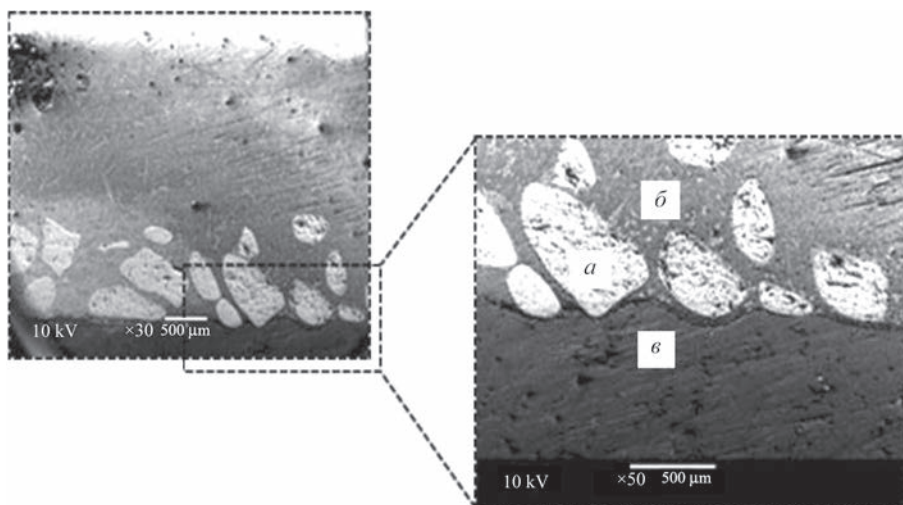


Рис. 9. Мікроструктура наплавленого зразка: карбідна зона (а), некарбідна зона (б), підкладка (в) [14]

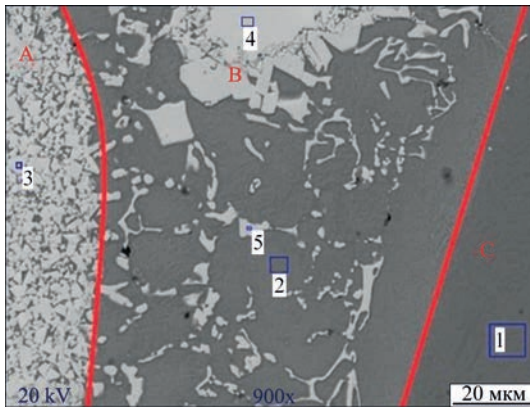


Рис. 10. Мікроструктура зуба: 1 – підкладка (сталь основи зуба); 2 – матриця WC покриття в перехідній зоні; 3 – WC; 4 – WC у перехідній зоні; 5 – WC у перехідній зоні; зони: А – покриття; В – перехідна зона (зона змішування); С – підкладка (тіло зуба) [15]

Co і Fe (матрицю), а також містить наночастинки WC розміром 0,06...0,25 мкм. Зона 2 (рис. 10) показує, що це сталь із підвищеним вмістом Mn, Co та W (табл. 6), які увійшли в перехідну зону від карбідного покриття на основі кобальтового сплаву, в якому розподілені частинки карбіду вольфраму. Аналіз зон 3 і 5 це підтверджує.

Результати випробувань на мікротвердість за Віккерсом показали, що основа зуба має середню твердість 328 HV, тоді як твердість карбідного покриття зуба буде набагато вищою, до 2200 HV (у середньому 1667) [15].

На даний час нові методи ремонту зношених ділянок бурових доліт із нанесенням зносостійкого покриття дозволяють ефективно вирішувати ряд проблем щодо зношування лопатей і кор-

пусів в умовах гідроабразивного зносу, корозії тощо. Для дослідження зносостійкості захисних покриттів в умовах гідроабразивного зносу було обрано композиційні матеріали, що містять карбіди вольфраму на різній основі, а саме: TeroCote 7888T (Castolin) на основі нікелю, Реліт «ЛЗ-11-7» (Україна) і Diamax M (Castolin) на основі заліза [16]. Нанесення наплавлених шарів на дослідні зразки, виготовлені зі Ст. 45, виконували дуговим способом неплавким вольфрамовим електродом у захисному газі – технічному аргоні. Для визначення мікроструктури були виготовлені мікрошліфи з наплавленим шаром. Металографічні дослідження показали, що наплавлений шар і основний метал поєднує тонкий перехідний шар дифузійного походження, що вказує на те, що не відбулось оплавлення основного металу та розчинення в ньому присадного металу (рис. 11).

Результати випробувань на твердість (HRC) наплавлених шарів показали, що при наплавленні на Ст. 45 (еталон) з використанням присадних матеріалів Diamax M і Реліту «ЛЗ-11-7» твердість покриття в середньому на 15...20 % вище, ніж при використанні TeroCote 7888T [16]. У результаті досліджень на зносостійкість встановлено, що опір гідроабразивному зносу корозійностійкого захисного покриття TeroCote 7888T на основі нікелю з колотими частинками карбіду вольфраму перевищує зносостійкість реліту «ЛЗ-11-7» (сферичні гранули карбіду вольфраму) та Diamax M (подрібнені частинки карбіду вольфраму) на основі заліза в 1,5 та 2,0 рази відповідно [16]. На рис. 12 наве-

Таблиця 6. Елементний склад матеріалу в різних ділянках зуба [15]

Елемент	Розташування														
	1			2			3			4			5		
	Похибка	Концентрація		Похибка	Концентрація		Похибка	Концентрація		Похибка	Концентрація		Похибка	Концентрація	
	ат. %	мас. %	ат. %		мас. %	ат. %		мас. %	ат. %		мас. %	ат. %		мас. %	ат. %
Si	0,403	0,497	0,250	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Mn	0,431	0,347	0,342	1,031	2,445	2,244	–	–	–	–	–	–	0,778	2,503	1,284
Fe	6,218	95,876	95,958	5,772	90,158	84,128	0,594	2,913	0,903	–	–	–	3,462	55,166	28,772
Ni	0,944	3,279	3,450	0,494	0,958	0,940	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Co	–	–	–	1,055	3,397	3,345	–	–	–	–	–	–	0,678	2,345	1,291
W	–	–	–	1,566	3,014	9,343	2,627	97,087	99,097	5,563	100,0	100,0	2,196	39,986	68,653

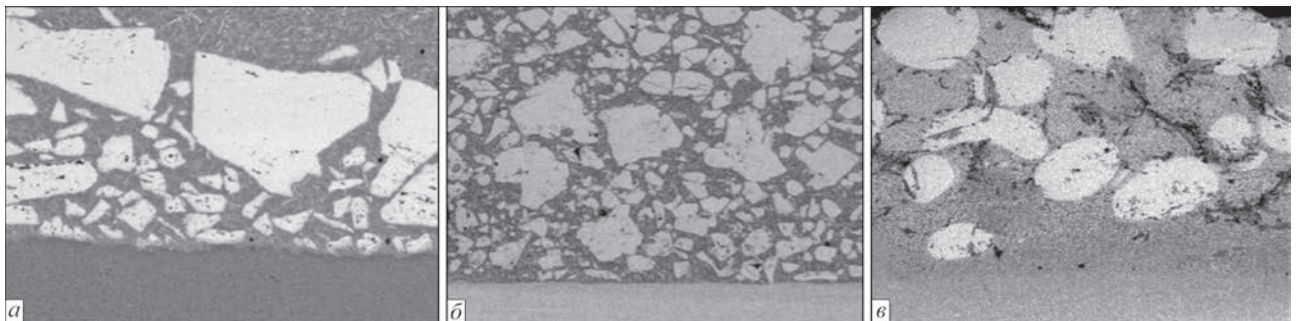


Рис. 11. Мікроструктура (×100) металу покриттів, отриманих з використанням присадних матеріалів: TeroCote 7888T (а); Diamax M (б); Реліт «ЛЗ-11-7» (в) [16]

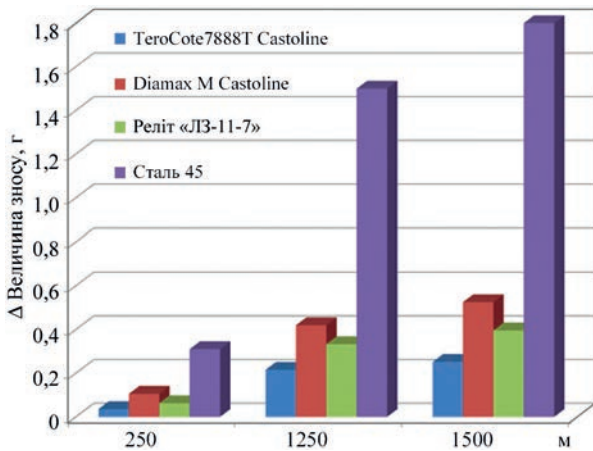


Рис. 12. Зношування наплавленого шару композиційних матеріалів і Ст. 45 [16]

дено середні величини зношування наплавленого шару композиційних сплавів при гідроабразивному зношуванні в залежності від шляху тертя.

Грунтуючись на результатах досліджень гідроабразивного зношування композиційних матеріалів, кращий результат показав корозійностійкий композит TeroCote 7888T (Castolin). Дослідження на корозійну стійкість металу з наплавленим шаром TeroCote 7888T проводили в лабораторних умовах, які моделюють експлуатацію бурового долота під час буріння свердловини (температури, хімічного складу, наявності зносу тощо). Результати проведених досліджень [17] показали, що застосування захисного покриття, нанесеного з використанням TeroCote 7888T, дозволяє знизити швидкість корозії робочих органів бурового інструменту зі сталі 30Х майже в 53 рази, що сприятиме продовженню його експлуатаційного ресурсу.

За результатами досліджень [16, 17] встановлено, що при наплавленні ТІГ-способом з використанням TeroCote 7888T під час формування наплавленого шару відбувається рівномірне розподілення частинок карбіду вольфраму по всьому об'єму наплавленого шару, яке обумовлює рівномірне розподілення твердості за глибиною покриття.

У попередніх роботах повідомлялося про виробництво композитного покриття NiCrBSi-WC, що отримано різними методами, та його механічні властивості. Проте в жодній роботі не наводяться дані про твердість, аналіз фазової структури та морфологію поперечного перерізу композиту NiCrBSi та NiCrBSi-WC. Також не проводилося дослідження впливу частинок WC на товщину розділу композитів NiCrBSi-WC. У [18] досліджували вплив різного вагового відсотка частинок WC на товщину межі розділу композитів NiCrBSi-WC та її характеристики при фрикційному зношуванні. Сплав NiCrBSi у вихідному стані та сплав NiCrBSi, що армований різним ваговим вмістом (20, 30 та 40 %) карбіду вольфраму (WC), наносили на нержавку сталь 316L із використанням процесу дугового зварювання з плазмовим переносом (PTAW). Аустенітна нержавка сталь 316L (SS-316L) з розміром пластини 50×50×30 мм використовувалася в якості підкладки для наплавлення. Зразки виготовлені із середньою товщиною покриття 4 мм за допомогою двопрхідного процесу дугового зварювання. Перед процесом наплавлення підкладки SS 316 L попередньо нагрівали до 400 °С для зменшення ймовірності появи гарячих тріщин, а зразки після наплавлення охолоджува-

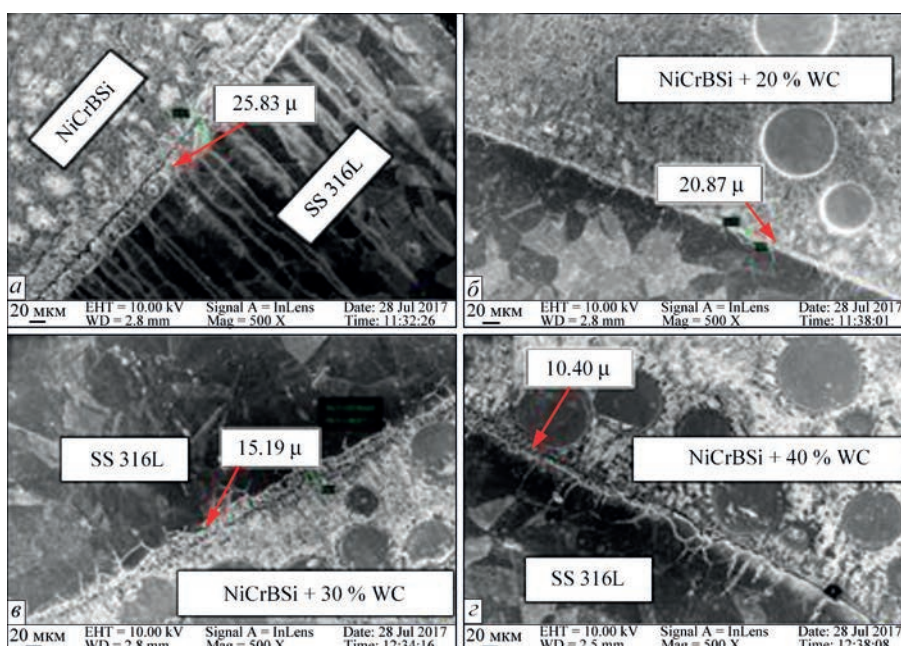


Рис. 13. Зображення поперечного перерізу композитів: NiCrBSi (а); NiCrBSi-(20 %) WC (б); NiCrBSi-(30 %) WC (в); NiCrBSi-(40 %) WC (г) [18]

ли природним чином. Мікроструктури поперечного перерізу покриттів NiCrBSi та NiCrBSi–WC демонструють структуру рівновісних зерен аустеніту (рис. 13).

Згідно з дослідженням мікроструктури поперечного перерізу композити NiCrBSi–WC демонструють дисперсію сфероїдальних частинок WC у матриці NiCrBSi. Наявність паралельних ліній на підкладці вказує на смугастість зерен, утворених під час РТАВ (дугового зварювання з плазмовим переносом). Межі зерен аустеніту розрізняються як довгі зерна між складовими фазами. Крім того, на межі розділу композитів NiCrBSi та NiCrBSi–WC утворилися перекристалізовані зерна більшого розміру. Межі зерен аустеніту виділені сплавом карбідів хрому та заліза з оксидами основних металів. Поверхня розділу спостерігається як чітко виражена зона з інтерметалідними елементами, що утворені компонентами NiCrBSi та SS 316L. Твердість композитів NiCrBSi суттєво збільшується зі збільшенням кількості частинок WC за рахунок меншого розчинення частинок WC по відношенню до NiCrBSi. Для композитів NiCrBSi-(20 %) WC було отримано кращі властивості зношування порівняно з іншими композитами [18].

**Сучасні розробки щодо нанесення покриттів методом лазерного наплавлення.** У літературі найчастіше повідомляють про методи нанесення покриття, а саме: зварювання (ручне дугове, плавким та неплавким електродом), плазмове, термічне, газополуменеве наплавлення та ін. На відміну від традиційних методів нанесення покриттів, метод лазерного наплавлення забезпечує металургійне з'єднання з підкладкою та її мінімальне переплавлення. Існує багато публікацій, в яких автори описують металоматричні композитні покриття (МКП). Завдяки наявності твердих частинок карбідів, таких як WC, VC тощо, МКП мають набагато кращу зносостійкість. Мікроструктура цього типу покриттів подібна до мікроструктури спечених ма-

теріалів. До цього часу більшість досліджень була зосереджена на виробництві МКП на основі Fe або Ni. Однак у меншій кількості робіт представлено виробництво МКП зі сплавів на основі Co, зокрема зі сплаву Stellite-6. У [19] представлено властивості зносостійких покриттів, що нанесені на сталь методом лазерного наплавлення за порошковою технологією. Як підкладку використовували низьковуглецеву сталь розміром 20×20×5 мм. Сферичний порошок Stellite-6 із середнім розміром часточок 50 мкм використовували як матеріал для покриття. Порошкову суміш Stellite-6/WC вдували у ванну розплаву за допомогою газу-носія (гелію). Частинки порошкоподібної суміші мали розміри 25...125 мкм і сферичну форму (рис. 14, а).

Мікроструктуру композитного покриття металевої матриці Stellite-6, армованого частинками карбиду вольфраму, наведено на рис. 14, б. Виявлено дуже велику кількість частинок карбиду вольфраму в матриці Stellite-6. Карбіди не розплавлялися й отримане покриття мало мікроструктуру, подібну до спечених карбідів. Спостерігався нерівномірний розподіл частинок карбиду (рис. 14, а). Видно, що два порошки погано змішалися. Це, ймовірно, відобразилося на мікроструктурі покриття. Характерною особливістю всіх композитних покриттів є дендритна мікросегрегація, яка є результатом різної швидкості охолодження, а отже, різної кристалізації матриці на поперечному перерізі покриттів [19]. Відмінності в мікроструктурі матриці найбільш помітні навколо карбідів вольфраму, а також на межі між покриттям і сталеву підкладкою. Показано, що присутність частинок WC у матриці Stellite-6 позитивно впливає на механічні властивості, але негативно позначається на корозійній стійкості виготовлених поверхневих шарів у порівнянні з неармованим покриттям. За допомогою рентгенофазового аналізу підтверджено наявність твердих фаз (WC, W<sub>2</sub>C, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> і M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>) у матриці, які впливають на суттєве підвищення

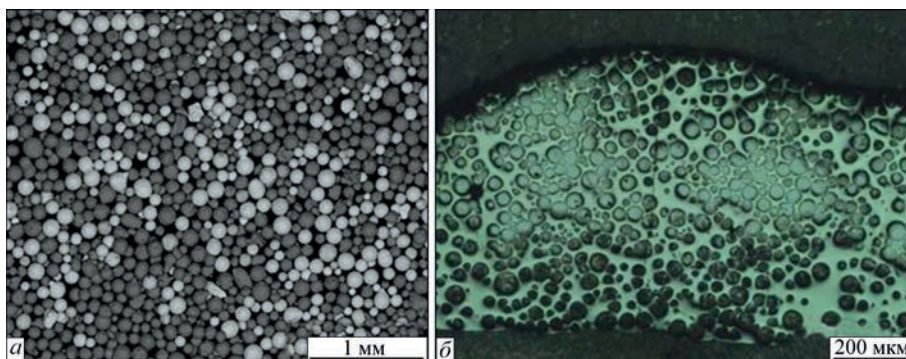


Рис. 14. Структура покриття: форма і розмір частинок порошкової суміші (а); Stellite-6/WC, отримане за допомогою лазерного променя потужністю 550 Вт і швидкістю сканування 400 мм/хв (б) [19]

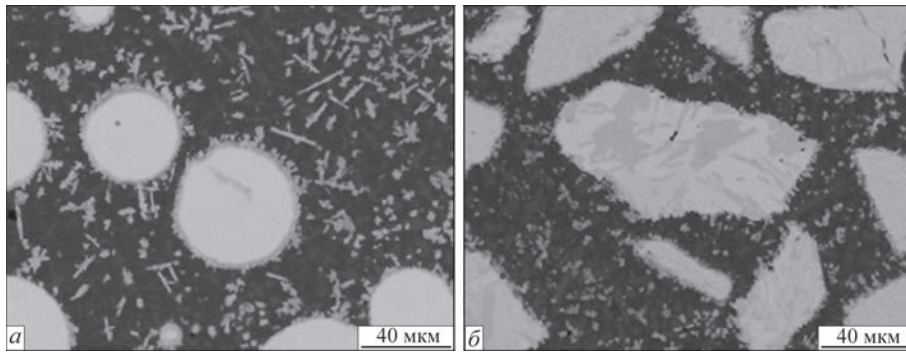


Рис. 15. Мікроструктура покриттів, отриманих за допомогою лазерного наплавлення з використанням сплаву Ni + 60 мас. % сферичних (а) або неправильної форми (б) карбідів вольфраму [20]

мікротвердості покриттів. Вимірювання твердості в межах матриці покриття показали, що матеріал покриття характеризується однаковою твердістю (близько 700 HV), а частинки WC – 2500 HV [19].

Зносостійкі покриття, що нанесені лазером, можуть складатися з різних типів карбідів вольфраму (сферичних і дроблених), впроваджених у металеву матрицю NiCrBSiCFe [20]. При оптимальних параметрах процесу отримують покриття без тріщин завтовшки 0,85...1 мм, що має відмінне зчеплення з підкладкою із вмістом карбиду до 60 мас. % і твердістю 40...55 HRC. Дослідження мікроструктури покриттів показує наявність сферичних або дроблених карбідів вольфраму та дисперсних фаз у металевій матриці (рис. 15).

Мікроструктура покриттів показує, що частинки карбиду частково розчиняються по периметру і навколо них утворилася карбідна фаза, яка врастає в металеву матрицю. Структура дробленого карбідного порошку складається з голок WC у матриці W<sub>2</sub>C. Стосовно зносостійкості показано, що фаза W<sub>2</sub>C твердіша, але також крихкіша, ніж фаза WC [20]. Крім того, фаза W<sub>2</sub>C легше розчиняється в металевій матриці під час лазерного наплавлення, ніж фаза WC. Вищий ступінь розчинення карбиду вольфраму в металевій матриці шкідливий з двох причин: це призводить до зниження міцності матриці і, як наслідок, до високої схильності до розтріскування під час наплавлення, а також до втрати експлуатаційних властивостей кераміки як зміцнюючої фази. При оптимальних параметрах лазерного наплавлення відбувається деяке розчинення частинок карбиду вольфраму в матриці на

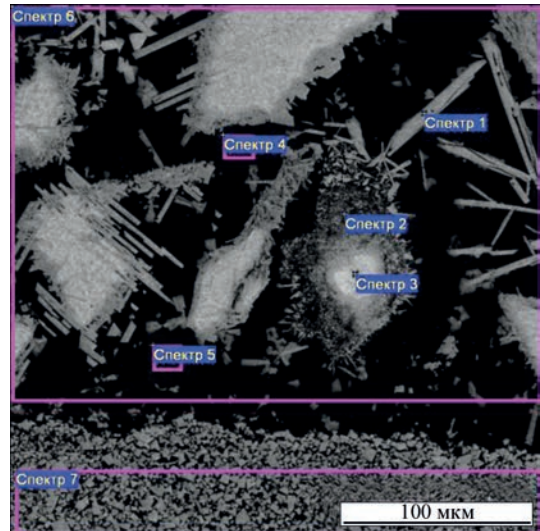


Рис. 16. Мікроструктура шару TeroCote 7888T, наплавленого на сплав BK10 [21]

Таблиця 7. Аналіз співвідношень Co для сумішей WC [22]

Символ	Маса елементів, %				
WC	100	90	80	70	60
Co	0	10	20	30	40

основі нікелю, що спричиняє утворення дрібнодисперсних змішаних карбідів в металевій матриці та збільшення карбідної фази в металевій матриці навколо первинних карбідів.

Такі особливості формування структури покриття спостерігались при застосуванні абразивнотривкого матеріалу TeroCote 7888T (Castolin), що являє собою нікелевий сердечник, покритий композиційним самофлюсувальним сплавом. Останній містить велику кількість колотих карбідів вольфраму неправильної форми, що розподілені в матриці сплаву на основі нікелю (система

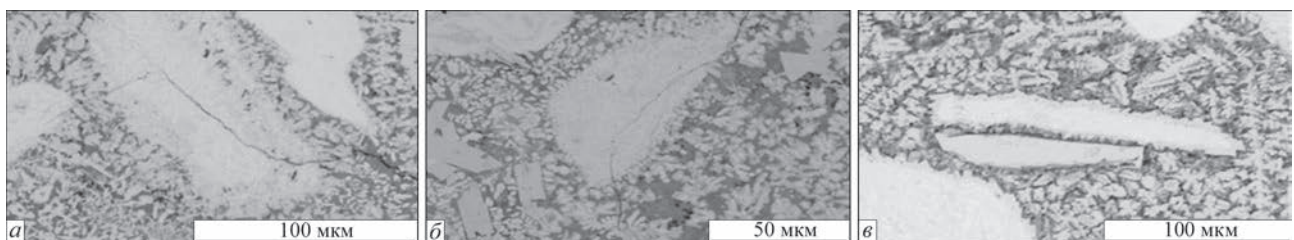


Рис. 17. Мікроструктурна еволюція покриттів: 100 % WC (а), 80 % WC–20 % Co (б) і 60 % WC–40 % Co (в) [22]

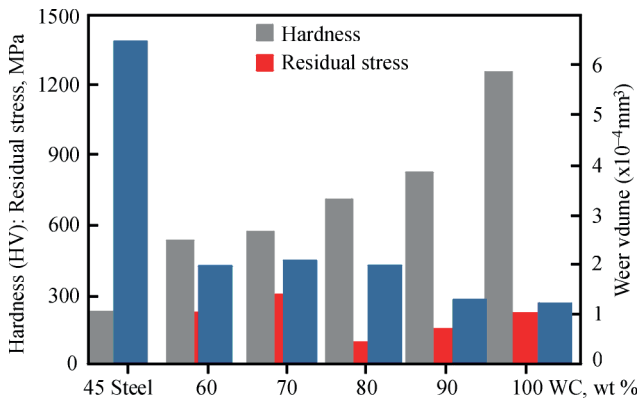


Рис. 18. Результати вимірювання об'єму зносу, твердості та залишкових напружень плакуючого шару з різними композиціями WC [22]

Ni–Cr–B–Si) [21]. Структура наплавленого шару складається з часточок карбиду вольфраму неправильної геометричної форми різних розмірів, які розподіляються в нікель-хромовій матриці. Окрім того, спостерігаються включення голкоподібної фази, що виділяється у вигляді дисперсних частинок по периметру карбідів вольфраму (рис. 16). Це свідчить про наявність дифузійних процесів під час нагріву та взаємодію матриці з карбідами вольфраму й їх часткове розчинення.

У [22] наведено результати досліджень механічних властивостей покриттів з різним відсотковим вмістом добавок Co в WC. На металеві зразки сталі 45 методом лазерного наплавлення наносилося покриття з різним масовим вмістом добавки Co в порошковий WC. Порошкові суміші WC/Co складалися з порошків сплавів WC і Co розмірами від 0,125 до 0,300 мм. У табл. 7 показані пропорції сумішей: 100 % WC; 90 % WC-10 % Co; 80 % WC-20 % Co; 70 % WC-30 % Co та 60 % WC-40 % Co.

Результати досліджень мікроструктури покриттів (рис. 17) показують, що високі залишкові напруження викликають значне розтріскування на 100 % WC і що активність розтріскування знижується при додаванні 20 % кобальту до WC.

Мікроструктура зони покриття в основному складається зі стрижневих дендритів і дрібнішої евтектики при 100 % WC, тоді як зона покриття при 60 % WC–40 % Co складається, в основному, з аустенітних дендритів і блокових карбідів. На рис. 18 наведено гістограми твердості, об'ємів зносу та залишкових напружень у зразках з покриттям, що отримані з різною кількістю Co у WC.

Зрештою збільшення кількості Co у WC не призвело до зменшення залишкових напружень через меншу кількість крихкого карбиду. Мікротвердість наплавленого шару з лазерним покриттям при 80 % WC-20 % Co на 850 HV вище, ніж у підкладки 221 HV [22]. Загалом оптимальна ефективність

лазерних наплавлень успішно досягається за допомогою композиції 80 % WC, змішаної з 20 % Co.

## Висновки

Розглянуто різні методи (газополуменеве, дугове, лазерне наплавлення, термічне розпилення) отримання композитних зносостійких покриттів, що експлуатуються в абразивному середовищі та підвищують експлуатаційні характеристики виробів. Отримано структуру композитних покриттів на базі Co, Ni, Fe, Cu, NiCrBSi, NiCrBSiFe, що містять різне співвідношення карбідів вольфраму. Показано, що зі зменшенням співвідношення між кількістю фаз  $W_2C$ , WC і  $WC_{1-x}$  в евтектичному сплаві системи WC– $W_2C$  підвищуються механічні властивості покриття. Наведено технологічні характеристики зносостійких покриттів, які залежать від параметрів технологічного процесу їх нанесення. Наразі проводяться дослідження з метою удосконалення й підвищення функціональних властивостей зносостійких покриттів.

Результати проведених досліджень можуть бути корисними для науковців та інженерного складу підприємств, що займаються підвищенням експлуатаційних властивостей конструкцій різного призначення.

## Список літератури/References

1. Seger, R. (2013) *Effect of tungsten carbides properties of overlay welded WC/NiSiB composite coatings*. MG 202X Examensarbete inom Maskinteknik. Handledare: Lorenzo Daghini, Höganäs, Sverige. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:730829/FULLTEXT01>
2. Pierson, H.O. (1996) *Handbook of refractory carbides and nitrides*. New Jersey, Noyes publications, pp. 100–104, 113–115.
3. Троснікова І.Ю., Лобода П.І. (2019) Вплив умов отримання на мікроструктуру, фазовий склад та властивості евтектичного сплаву системи WC– $W_2C$ . *Надтверді матеріали*, **1**, 66–70. DOI: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000969955>  
Trosnikova, I.Yu., Loboda, P.I. (2019) Vplyv umov otrymannya na mikrostrukturu, fazovyi sklad ta vlastyosti evtektichnoho splavu systemy WC– $W_2C$ . *Nadverdi materialy*, **1**, 66–70 [in Ukrainian]. DOI: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0000969955>
4. Zhudra, A.P. (2014) Tungsten carbide based cladding materials. *The Paton Welding J.*, **6-7**, 66–71. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.13>
5. Zakharova, E.S., Markov, I.Yu., Maslov, A.L. et al. (2017) Morphology of powders of tungsten carbide used in wear-resistant coatings and deposition on the PDC drill bits. *J. of Physics*, **857**, 012058. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/857/1/012058>
6. Shrivastava, P., Mishra, T.K., Saxena, A.C. (2013) Effect of WC concentration on abrasive wear properties of the thermally sprayed WC–Ni coatings. *International J. of Scientific and Research Publications*, **3(6)**.
7. Bao, J., Newkirk, J.W., Bao, S. (2004) Wear-resistant WC composite hard coatings by brazing. *J. of Materials Engineering and Performance*, **13**, 385–388. DOI: <https://doi.org/10.1361/10599490419874>
8. Markova, I.Yu., Zakharova, E.S., Maslov, A.L. et al. (2017) The study of microstructure of wear-resistant coatings applied for protection from abrasive wear of horizontal and tilt drilling drill bits. *13th International Conference on Films*

- and Coatings. *IOP Conf. Series: J. of Physics*, **857**, 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/857/1/012028>
9. Noor Aqilah Ahmad, Zakiah Kamdi, Abdul Latif Mohd Tobi (2018) Wear and corrosion behavior of tungsten carbide based coating on carbon steel. *International J. of Integrated Engineering*, **10**(4), 119–125. DOI: <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.04.020>
  10. Md Sarfaraz Alam, Anil Kumar Das (2022) A critical review of coating on AISI 1045 steel substrate by high velocity oxygen fuel (HVOF). 3rd International Conference on Future of Engineering Systems and Technologies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **1228**, 012002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1228/1/012002>
  11. Lutz-Michael Berger (2015) Application of hardmetals as thermal spray coatings. *Int. J. of Refractory Metals and Hard Materials*, **49**, 350–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029>
  12. Houdková, Š., Zahálka, F., Kašparová, M., Berger, L.-M. (2011) Comparative study of thermally sprayed coatings under different types of wear conditions for hard chromium replacement. *Tribology Letters*, **43**, 139–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-011-9791-9>
  13. Abderrahmane, A., Gaceb, M., Cheikh, M., Le Roux, S. (2021) Wear behavior and microstructure of thermally sprayed NiCrBSiFeC and composite NiCrBSiFeC–WC(Co) coatings. *Materials Science (Medziagotyra)*, **27**(2), 175–183. DOI: <http://doi.org/10.5755/j02.ms.24478>
  14. Nagentrau, M., Mohd Tobi, A.L., Omar, A.S., Ismail, M.I. (2019) Preheat treatment on the tungsten carbide hardfacing: Microstructure analysis. 1st International Conference on Industrial and Manufacturing Engineering. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **505**, 012150. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/505/1/012150>
  15. Jurij Šporin, Primož Mrvar, Blaž Janc, Željko Vukelic (2021) Expression of the self-sharpening mechanism of a roller cone bit during wear due to the influence of the erosion protection carbide coating. *Coatings*, **11**, 1308. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11111308>
  16. Stefaniv, B.V. (2016) Investigation of wear resistance of protective coatings under conditions of hydroabrasive wear. *The Paton Welding J.*, **9**, 26–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.09.05>
  17. Stefaniv, B.V., Nyrkova, L.I., Larionov, A.V., Osadchuk, S.O. (2020) Corrosion resistance of composite material deposited by TIG method using flexible cord TeroCote 7888T. *The Paton Welding J.*, **2**, 26–29. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.02.05>
  18. Deenadayalan, K., Murali, V. (2019) Role of various weight percentages of WC particle on interface thickness and friction-wear property of NiCrBSi–WC composite fabricated using PTAW process. *Materials Research Express*, **6**, 046542. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aafd4f>
  19. Bartkowski, D., Matysiak, W., Wojtko, K. (2018) Stellite-6 surface layers reinforced with hard and refractory WC particles produced on steel for metal forming. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, **393**, 012093. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012093>
  20. Rombouts, M., Persoons, R., Geerinckx, E. et al. (2010) Development and characterization of nickel based tungsten carbide laser clad coatings. *Physics Procedia*, **5**, 333–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.154>
  21. Максимова С.В. (2023) Структура абразивнотривких матеріалів на основі нікелю та заліза, *Automatic Welding*, **12**, 13–17. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.12.02>
  22. Maksymova, S.V. (2023) Structure of nickel and iron based abrasion-resistant materials. *Автоматичне Зварювання*, **12**, 13–17. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.12.02>
  22. Chaoyang Zhang, Shenyu Chen, Echo Yang, Mingder Jean (2023) Effect of cobalt fraction mixing WC clads on microstructural evolution, crack formation and tribological properties by laser cladding. *J. of Physics, Conf. Ser.*, **2519**, 012039. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2519/1/012039>

## THE INFLUENCE OF TUNGSTEN CARBIDE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WEAR-RESISTANT COATINGS PRODUCED BY VARIOUS METHODS (Review)

B.V. Stefaniv, S.V. Maksymova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [stefanivbogdan61@gmail.com](mailto:stefanivbogdan61@gmail.com)

Surface coating with wear-resistant materials is a reliable and cost-effective process used for the manufacture and repair of tools, materials and machine components that require desirable surface properties such as resistance to corrosion, erosion and wear. Wear-resistant coatings cover a wide range of applications in many industries, for example, in automotive and aerospace, oil and mining (as components of drill bits or tunneling machines), in the manufacture of cutting tools for processing metal components. This review presents the main types of wear-resistant coatings based on Co, Ni, Fe, Cu, Cr, NiCrBSi, NiCrBSiFe and others with 10% to 90 % tungsten carbide particles in the matrix. By changing the phase composition and surface structure of the material by forming protective coatings, it is possible to achieve a significant increase in operational properties, such as hardness, strength, wear resistance, heat resistance, corrosion resistance, etc. In both wear-resistant coatings and hard alloys, of the three specified carbide phases in the W–C system, namely WC, W<sub>2</sub>C and WC<sub>1-x</sub>, WC is the only stable carbide at room temperature, and it is the phase that must be present in wear-resistant coatings in order to obtain optimal properties. Given the rapid development of wear-resistant coatings, this article provides an overview of the main types of wear-resistant abrasive coatings, application methods and their properties. The results of the above studies may be useful for scientists and engineering staff of enterprises engaged in improving the operational properties of structures for various purposes. 22 Ref., 7 Tabl., 18 Fig.

*Keywords: wear-resistant, composite coatings, tungsten carbide, wear, wear resistance, abrasion resistance, surfacing, microstructure, hardness*

Отримано 13.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 04.08.2025

Прийнято 08.10.2025.

**НОВА КНИГА**

**ЗВАРЮВАННЯ. МЕТАЛУРГІЯ. МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

Серія книг та монографій за редакцією академіка НАН України І.В. Кривцуна

*Максимов С.Ю., Винничук С.Д., Прилипко О.О. Розробка технологічних основ та устаткування при застосуванні зовнішнього електромагнітного впливу при зварюванні під водою* — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2025.